

DOI: 10.11766/trxb202307110263

魏曦皓, 李江文, 钟守琴, 慈恩, 孟珣珣, 魏朝富. 一种基于数字图像技术量化土壤结构体形状的方法[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1537–1547.

WEI Xihao, LI Jiangwen, ZHONG Shouqin, CI En, MENG Xunxun, WEI Chaofu. A Method for Quantifying the Ped Shape Based on Digital Image Technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(6): 1537–1547.

一种基于数字图像技术量化土壤结构体形状的方法^{*}

魏曦皓, 李江文, 钟守琴[†], 慈恩, 孟珣珣, 魏朝富

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 土壤结构是土壤中各种过程的物理框架, 对土壤物理、化学及生物化学过程量化研究具有极为重要的意义。现有土壤结构的量化方法过度依赖于实验室技术, 导致其受限于样本量级、分辨率和成本等因素的影响。为了克服这些限制, 本研究以高分辨率土壤剖面图像为研究对象, 利用数字图像技术量化土壤结构体形状。结果表明: 典型的结构分类和主观描述可以转化为定量的形态计量学指标 (如圆角率、圆度、长轴椭圆角、长宽比、坚固度和宽高比等); 9 个土壤剖面中表层土壤结构体的平均圆角率、圆度和宽高比 (0.79、0.74 和 1.05) 均高于心土层 (0.64、0.68 和 0.94), 平均长宽比和长轴椭圆角 (1.35°和 42.73°) 均低于心土层 (1.79°和 49.33°)。因此, 利用数字图像技术能够准确地量化和直观地表征土壤结构体的形态特征, 且该技术阐明了成土过程中土壤结构体形状逐渐从块状结构向圆球状结构转化的规律。

关键词: 土壤结构体; 数字形态计量学; 结构体形状; 剖面形态

中图分类号: S152.4 文献标志码: A

A Method for Quantifying the Ped Shape Based on Digital Image Technology

WEI Xihao, LI Jiangwen, ZHONG Shouqin[†], CI En, MENG Xunxun, WEI Chaofu

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] Soil structure is the physical framework for various processes in soils and is of great importance for quantitative studies of soil physical, chemical and biochemical processes. Existing methods for quantifying soil structure are overly dependent on laboratory techniques, resulting in them being limited by factors such as sample size, resolution and cost. [Method] To overcome these limitations, this study utilizes digital imaging techniques to quantify ped shapes using high-resolution soil profile images. [Result] The results show that typical structural classifications and subjective descriptions can be transformed into quantitative morphometric (circularity, roundness, major-axis ellipse angle, aspect ratio, solidity, width-to-height ratio) data. Also, the average circularity, roundness, and width-to-height ratio of ped in the topsoil layer in the nine soil profiles (0.79, 0.74, and 1.05) were higher than those in the heart soil layer and the parent soil layer (0.64, 0.68, and 0.94), and their average aspect ratio and major-axis ellipse angle (1.35 and 42.73) were lower than those of the heart soil and parent material layers (1.79 and 49.33). [Conclusion] Therefore, the use of digital imaging techniques can accurately quantify and

^{*} 国家自然科学基金项目 (42077007) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42077007)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhongsq2021@swu.edu.cn

作者简介: 魏曦皓 (1997—), 男, 重庆市人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤物理。E-mail: wxh307318870@163.com

收稿日期: 2023-07-11; 收到修改稿日期: 2024-04-22; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-07-04

visually characterize the morphology of ped shape, and the technology elucidates the law that the shape of ped gradually transforms from blocky structure to granular structure in the process of soil formation.

Key words: Ped; Digital morphometrics; Ped shape; Profile morphology

土壤结构体是指土壤颗粒排列成具有相似形状、大小、方向和稳定程度的土块或土团^[1-3],其通常采用定性的形状类别进行描述,如板状、粒状、块状或柱状等^[4]。土壤结构体形状(也称为土壤结构体类型)对几种重要的土壤生物、物理和化学过程具有重大影响(如植物根的延伸、水的渗透和溶质的运输)^[5],也为探明土壤成因和土壤年龄提供了线索^[6-7]。尽管土壤结构体的研究已受到人们的广泛关注,但对其形状的描述受到传统主观性分类的限制,导致其在分辨真实形状时具有不确定性。在野外实地调查中,土壤研究人员通常依据经验将从土壤剖面中观察到的土壤结构体与理想化的图形进行比较^[8],从而划分结构体的形状类别,这种分类具有一定的主观性、偶然性。同时,由于缺乏可定义的形状标准,往往仍需评估其他信息后再进行分类(如在剖面中的位置、大小和颜色等)。在室内分析测试中,一些成像方法(如摄像技术和土壤切片技术等),已用于量化土壤微形态或孔隙^[9-12]。这些方法往往受到样本量级限制,主要集中在微米到厘米量级的团聚体或孔隙^[13-14]。然而,单个土壤结构体的量级往往高于团聚体或孔隙。此外,图像分辨率对结构体形状的量化也有相当大的影响,相对较高的图像分辨率(如70 mm像素)对于准确记录正确的几何图形至关重要^[15]。最近新开发的技术如计算机X射线断层扫描虽然可以获得土壤团聚体的准确三维几何特征,但其费用昂贵,分析过程较为复杂,样品在运输过程也容易遭到破坏^[16-17]。因此,亟须一种相对客观、准确的量化土壤结构体形状的方法以摆脱主观性、样本量级、分辨率和成本等因素的限制。

20世纪,Holden^[18]通过数字图像计算出描述物体几何形状的“圆角率”、“棱角度”和“表面粗糙度”等指标。在此基础上,Hartemink和Minasny^[19]提出了“数字形态计量学”这一描述,且应用数字形态测量技术能够定量表征土壤属性,然而这一技术在土壤结构体的研究尚未广泛应用。因此,本研究以土壤剖面的高分辨率图像为研究对象,采用数字形态计量学方法,从高分辨率照片勾勒出土壤结

构体的不同形状,并使用图像分析软件从生成的形状中计算出形态计量学特征指标(圆角率、圆度、长轴椭圆角、长宽比、坚固度和宽高比),从形状、角度、方向等视角量化土壤结构体形状,明确土壤结构体的数字形态特征,摆脱主观性、样本量级、分辨率和成本等问题的限制。

1 材料与方法

本研究以重庆典型区域的耕作土壤作为研究对象,共选择了9个土壤样地,采用数字形态计量学方法,从高分辨率照片勾勒出土壤结构体的不同形状,使用图像分析软件从生成的形状中计算出形态计量学特征指标,并根据形态计量学特征对结构体进行划分。作为对照,本研究还邀请了28位土壤从业人员浏览了原始土壤剖面照片以及数字化后结构体形状的图像,依据专家经验对土壤结构体形状进行分类。

1.1 土壤剖面图像采集及基本信息

本研究共选择了9个土壤样地,挖取的土壤剖面长、宽为1.5 m,深度约1.3 m至2 m不等,并根据土壤剖面发生学特性划分剖面层次,记录土层厚度、土壤颜色、结持性、质地、黏着性、可塑性、新生体、根系、动物活动等描述性特征,样品采集从下向上逐层进行,每层采集约3 kg土样。拍照前对土壤剖面进行清洁处理,以减少表面粗糙度和阴影对图像质量的影响,在自然光照条件下垂直于剖面拍摄,图像为2604×4242分辨率的JPEG格式,并将每个土壤剖面图像的光滑面进行裁剪,只保留其毛面部分。表1列出了关于供试土壤剖面的详细信息。

1.2 剖面图像处理

首先通过Adobe Illustrator(Adobe Systems, San Jose, CA)中钢笔工具手工绘制9个土壤剖面照片中易于识别的结构体样本,过程中为了准确地勾勒出每张照片中的结构体样本,图像被数码相机放大了约15倍。具有相似颜色的像素被认为是土壤结构

表 1 供试土壤剖面信息

Table 1 Information of the test soil profile

剖面编号 Profile No.	剖面地点 Location	成土母质 Parent material	地形特征 Terrain features	植物或作物 Plant or crop	发生层 Horizon	土壤质地 Soil texture	酸碱度 Potential of hydrogen	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)
①	重庆市万州区 响水镇万民村 1 组	侏罗系遂宁组 红棕紫色泥岩 风化坡积物	低山上坡, 坡度分级为 中缓坡, 梯 田	单季水稻	Ap1	粉壤土	8.1	11.1
					Ap2	粉壤土	8.2	9.4
					Br1	粉壤土	8.1	5.0
					Br2	粉壤土	8.4	2.2
					Br3	粉壤土	8.3	2.6
					Bg	粉壤土	7.6	2.3
②	重庆市巴南区 丰盛镇油房村 4 社	三叠系须家河 组砂岩风化坡 积物	低山沟谷低 洼处, 坡度 分级为缓 坡, 梯田	单季水稻	Ap1	砂质黏壤土	7.0	18.0
					Ap2	砂质壤土	6.9	14.5
					Br1	砂质黏壤土	6.7	12.4
					E	壤土	6.8	8.8
					Br2	砂质黏壤土	7.1	5.2
					Bg1	壤土	7.0	4.6
③	重庆市江津区 永兴镇黄庄村 8 组	侏罗系沙溪庙 组紫色泥岩风 化残坡积物	低丘上坡, 坡度分级为 中缓坡	高粱、蔬菜、 金钱草	Ap	粉壤土	4.7	8.5
					Bw1	粉壤土	4.6	8.4
④	重庆市巫山县 红椿乡大坪村 5 社	三叠系石灰岩 风化坡积-洪 积物	中山上部内 山坡麓平缓 地段, 坡度 分级为微坡	玉米、马铃薯、 红薯、萝卜、 党参	Bw2	粉壤土	4.6	5.4
					Bw3	壤土	6.8	11.9
					Ab	粉壤土	6.8	20.2
					Bw4	粉壤土	6.9	14.5
⑤	重庆市酉阳县 宜居乡董河村 1 组	第四系全新统 黄色冲积物	低阶地	马铃薯、萝卜、 油菜	Ap	粉壤土	7.7	15.4
					Br1	粉壤土	7.8	10.8
					Br2	粉壤土	8.1	7.3
					Bg	粉壤土	8.0	6.2
					Cg1	壤土	7.8	4.7
					Cr	砂质壤土	7.9	4.8
⑥	重庆市巫山县 官渡镇水库村 5 组	三叠系巴东组 紫色粉砂岩、 泥岩风化残坡 积物	中山下坡, 坡度分级为 中坡	玉米(套红薯) -油菜或玉米- 油菜轮作	Ap	粉壤土	5.9	8.0
					Bw1	壤土	6.1	5.1
					Bw2	粉壤土	6.4	4.0
					C	黏壤土	6.5	4.7

续表

剖面编号 Profile No.	剖面地点 Location	成土母质 Parent material	地形特征 Terrain features	植物或作物 Plant or crop	发生层 Horizon	土壤质地 Soil texture	酸碱度 Potential of hydrogen	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)
⑦	重庆市垫江县 五洞镇龙滩村 12组	侏罗系遂宁组 红棕紫色泥岩 风化残坡积物	低丘下坡, 坡度分级为 中缓坡	红薯、黄豆、 油菜	Ap	粉壤土	8.5	6.6
					Bw1	粉壤土	8.6	3.8
					Bw2	壤土	8.6	3.3
					Br	粉质壤土	8.2	3.4
					BCr	黏壤土	8.2	2.9
⑧	重庆市大足区 龙水镇大围村 4组	侏罗系遂宁组 红棕紫色泥岩 风化坡积物	低丘坡麓, 坡度等级分 为缓坡, 梯 田	单季水稻或水 稻-油菜轮作	Ap1	粉壤土	8.1	15.4
					Ap2	粉质黏壤土	8.0	12.6
					Br1	粉壤土	8.1	8.0
					Br2	粉壤土	8.2	3.5
					Br3	粉壤土	8.2	2.3
⑨	重庆市垫江县 曹回镇龙家村 5组	侏罗系遂宁组 红棕紫色泥岩 风化残坡积物	低丘上部平 缓地段, 坡 度分级为缓 坡, 梯田	单季水稻	Ap1	粉质黏壤土	7.9	8.3
					Ap2	粉质黏壤土	8.1	7.0
					Br1	粉质黏壤土	7.9	3.1
					Br2	粉质黏壤土	7.7	2.1
					Br3	黏壤土	7.5	2.5
					Br4	壤土	7.2	2.5

体的一部分, 而介于两种可区分颜色之间的像素被认为是土壤孔隙(即土壤结构体之间的空间)。使用 Adobe Illustrator 从剖面照片中勾勒出的土壤结构体样本如图 1 所示。

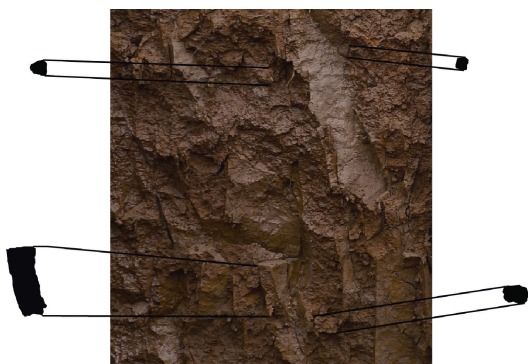


图 1 从剖面照片中勾勒出的土壤结构体样本

Fig. 1 A sample of the ped outlined from the profile photograph

而后, 将从 Adobe Illustrator 软件中勾勒出的土壤结构体图片导入到 Image J 软件(版本 1.48; <http://imagej.nih.gov>)中进行数字图像分析, 根据相

应图片中土壤剖面尺的刻度设定比例尺(本研究所有图片的比例尺单位为 cm), 随后对图像进行灰度化和二值化处理, 并根据二值化图像的“颗粒分析”功能量化每个结构体的数字形态计量学特征。数字图像分析过程如图 2 所示。

1.3 土壤结构体形状测定

土壤结构体形状特征由 Image J 软件测定, 选取的数字形态计量学特征指标包括圆角率、圆度、长轴椭圆角、长宽比、坚固度和宽高比, 通过形状、角度、方向等特征综合反映土壤结构体宏观与局部的变化特征与形态。数字形态计量学特征计算方法如下:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (1)$$

式中, C 为圆角率, 为物体面积 A 与周长相当于物体周长的完美圆面积 P 之间的比率, 圆角率值介于 0 和 1 之间, 接近 1 表示形状是平滑的圆形, 接近 0

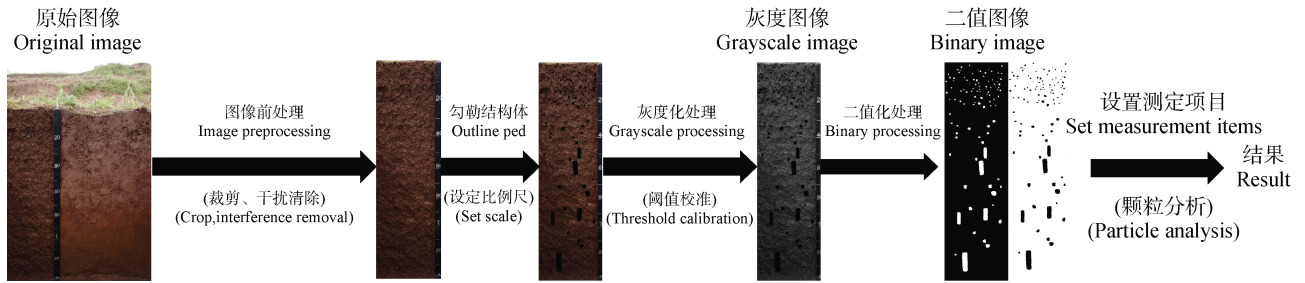


图 2 数字图像分析过程

Fig. 2 Digital image analysis process

表示形状是较粗糙或瘦长的，形状区域较小且角和边数较多的土壤结构体具有较低的圆角率值。

$$R = \frac{4A}{\pi E_{2maj}} \quad (2)$$

式中， R 为圆度，可根据物体的面积 (A) 和最佳拟合椭圆的主轴长度 (E_{2maj}) 计算得出，圆度值介于 0 和 1 之间，1 表示正圆，较低的圆度值，代表结构体具有更锐利和更清晰的边缘。

$$AR = \frac{E_{maj}}{E_{min}} \quad (3)$$

式中， AR 为长宽比，是最佳拟合椭圆的长轴 (E_{maj}) 与短轴长度 (E_{min}) 之比。长宽比的值相当于圆度 R 的倒数，范围介于 1 和 ∞ 之间。

$$S = \frac{A}{V} \quad (4)$$

式中， S 为固体度，为物体的面积与其凸面积 V 的比值。其中，凸面积定义为凸出部分的面积（即连接向外顶点和所有小于 180° 的内角所创建的多边形）。固体度为对给定物体的整体凸度（即颗粒边缘粗糙度）的测量，当物体的面积和凸出的面积相互接近时，物体变得更加坚固，接近 1 的值表示表面光滑，远离 1 的值表示表面粗糙度较大。

$$WH_{ratio} = \frac{W_{box}}{H_{box}} \quad (5)$$

式中， WH_{ratio} 为宽高比，为形状轮廓的外接矩形的宽度 (W_{box}) 与高度 (H_{box}) 的比值。外接矩形的方向是相对于图像的坐标系而言的，因此，宽高比既

是形状计量又是方向计量。

此外，本研究还利用长轴椭圆角（即与结构体形状的最佳拟合椭圆的长轴与平行于图像 x 轴的线之间的角度）来研究土壤结构体的方向。

1.4 土壤结构体形状分类

完成数字图像分析过程后，参照美国农业部土壤调查局的土壤结构分类表^[20]中的指标对二值化图像中的土壤结构体形状进行分类（表 2），如团粒状、次角块状、角块状、棱柱状、圆柱状。

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 和 Origin 2022 软件进行图表绘制，采用 SPSS 26 软件进行数据分析。采用单因素方差分析及最小显著性差异检验比较了土壤结构体形态计量学特征之间的差异和土壤从业人员对土壤结构体形状分类结果的差异，采用独立样本 T 检验比较了不同层次土壤结构体形态计量学特征的差异。

2 结果

2.1 土壤结构体分类

基于美国农业部土壤调查局的土壤结构分类表，967 个数字化的结构体分类及数量统计情况如表 3 所示。团粒状结构体数量占比最大，约占总量的 49.9%；次角块状和角块状分别占比 26.9% 和 16%；棱柱状和圆柱状占比最少，分别占总量的 5.3% 和 1.9%。

在对土壤从业人员的分类结果整理后得到图 3，如图所示，五类不同工作年限的从业人员平均正确率分别为 0.63、0.66、0.68、0.71、0.72，由此可知，分类的正确率随从事土壤工作时间增加而增加，值得注意的是，土壤从业人员对除了团粒状以外的其他土壤结构分类的准确率均未能超过 80%，0~7 年工作年限的从业人员对角块状和棱柱状分类准确

表 2 美国农业部土壤调查局的土壤结构分类表^[20]

Table 2 Soil Structure Classification Table of the U.S. Department of Agriculture Soil Survey

		块状-多面体状-球状沿一点的三轴大致相等					
A——类型：结构体的形状和排列	片状，水平轴较垂直轴长，沿水平面排列	棱柱状，水平轴较垂直轴短，直角		块状-多面体状，结构体表面平或弯曲，与周围结构体界面相吻合		球状-多面体状，结构体表面平或弯曲，与周围结构体界面不能吻合	
		无圆顶	有圆顶	平界面，棱角显	平界面夹圆，圆角顶多	结构体孔隙少	结构体孔隙多
B——级：结构体大小 (mm)	片状	棱柱状	柱状	块状	次角块状	团粒	团块
1. 很细或很薄	<1	<10	<10	<5	<5	<1	1
2 细或薄	1~2	10~20	10~20	5~10	5~10	1~2	1~2
3 中等	2~5	20~50	20~50	10~20	10~20	2~5	2~5
4 粗或厚	5~10	50~100	50~100	20~50	20~50	5~10	
5 很粗或很厚	>10	100	100	>50	>50	>10	
C——度：结构体的稳定性	0: 无结构	无团聚性或无定向的排列					
	1: 弱	结构体发育差，不稳定，界面不清，破碎后只有少量完整的小结构体，大部分为破碎的小结构体和非团聚物质					
	2: 中等	结构体发育好，中等稳定，原状土界面不明显，破碎后多为完整的小结构体，还有一些破碎的小结构体，而非团聚的物质少					
	3: 强	结构体发育好，稳定，界面清晰，彼此间联结弱，破碎后几乎都是完整的小结构体					

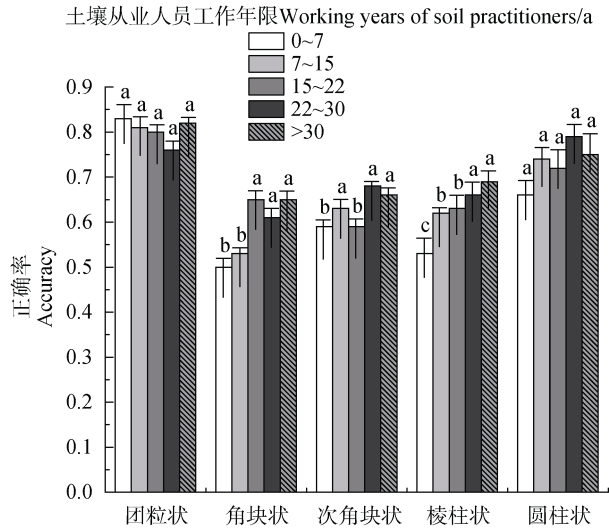
表 3 数字化后土壤剖面中结构体分类及数量统计

Table 3 Classification and quantity statistics of ped in the digitized soil profile

剖面编号 Profile No.	角块状 Angular blocky	圆柱状 Columnar	团粒状 Granular	棱柱状 Prismatic	次角块状 Subangular blocky	数量 Number
①	17	3	23	11	22	76
②	18	7	58	13	29	125
③	20	0	93	3	29	145
④	16	3	48	10	32	109
⑤	12	0	50	4	36	102
⑥	13	0	62	2	30	107
⑦	15	2	54	3	28	102
⑧	23	1	54	2	30	110
⑨	21	2	41	3	24	91
总体 Total	155	18	483	51	260	967

率甚至只有 50%左右。在五中结构类型中识别的困难程度为角块状>次角块状>棱柱状>圆柱状>团粒

状，其中识别团粒状的平均正确率为 81%，而识别角块状的平均正确率为 58%。



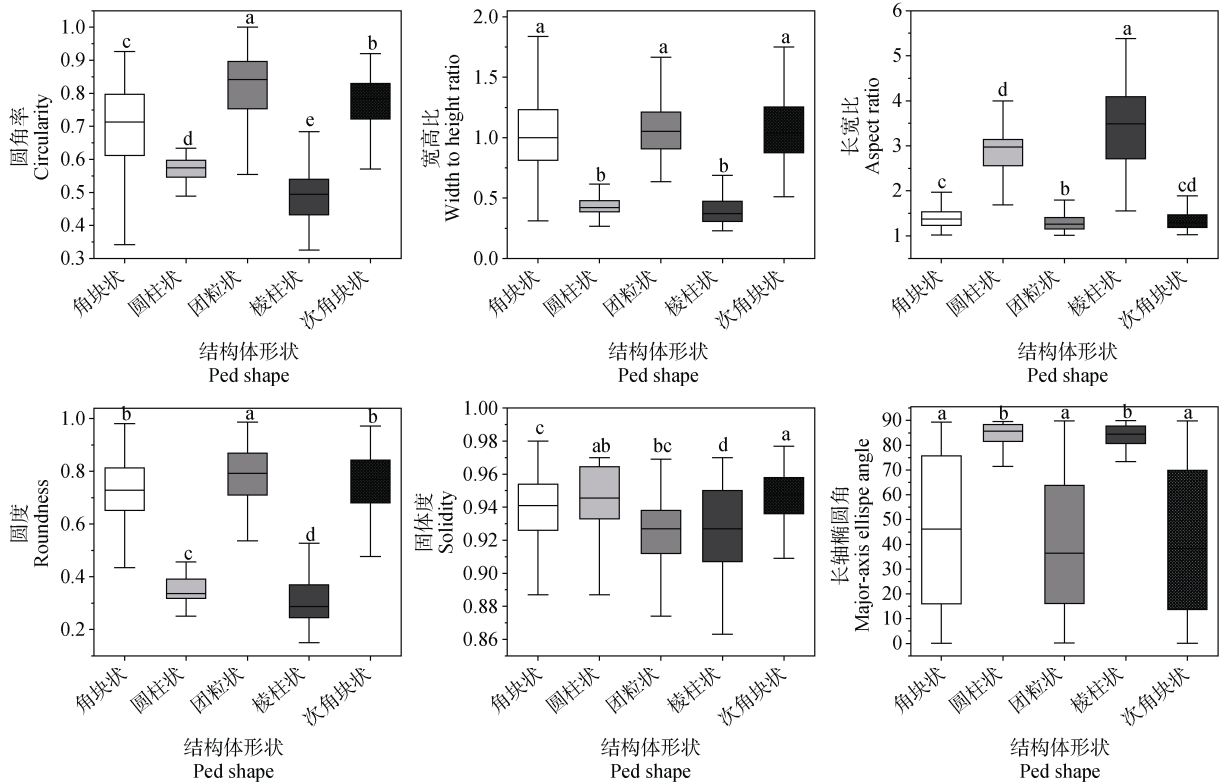
注：不同字母表示不同工作年限间差异显著 ($P < 0.05$)。
 Note: Different letters indicate significant differences between years of service ($P < 0.05$).

图 3 从事土壤的工作年限与土壤结构体分类正确率的关系

Fig. 3 The relationship between time spent working with soils and the correct classification of ped

2.2 形态计量学特征

如图 4 所示，团粒状结构的平均圆角率值高达 0.842，最高值甚至高达 0.972，与其他土壤结构（次角块状、角块状、圆柱状、棱柱状）均表现出显著差异 ($P < 0.05$)。次角块状、角块状的平均圆角率值分别为 0.784 和 0.713，各向异性的土壤结构体形状（圆柱状和棱柱状）的平均圆角率值相对较小，分别为 0.574 和 0.494；等维形状中的角块状、团粒状、次角块状的宽高比平均值分别为 1.014、1.051、1.039，三者之间并无较大差异，而各向异性形状中圆柱状和棱柱状宽高比平均值为 0.420 和 0.371，与等维形状的宽高比平均值差异显著；等维形状结构体（团粒状、次角块状、角块状）的长轴椭圆角介于 0 和 90° 之间，平均值分别为 36.5°、46.2°、38.3°，而各向异性结构体（圆柱状、棱柱状）的长轴椭圆角集中于 70° 到 90° 之间，平均值分别为 85.6°、84.4°；团粒结构的平均圆度值为 0.792，最高甚至达到 0.987，这与角块状 (0.728)、次角块状 (0.770)、圆柱状 (0.336)、棱柱状 (0.287) 相比表现出显著



注：不同字母表示不同结构体形状的形态特征值差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters indicate significant differences in morphological characterization values for different ped shapes ($P < 0.05$).

图 4 土壤结构体形状与数字形态计量学特征的箱线图
 Fig. 4 Box line diagram of ped shape and digital morphometrics

表 4 土壤剖面 A 层与 B 层土壤结构体形态计量学参数对比

Table 4 Comparison of morphometric parameters of ped shape in layer A and layer B of the soil profile

剖面编号 Profile No.	发生层 Horizon	数量 Number	圆角率 Circularity	圆度 Roundness	长宽比 Aspect ratio	长轴椭圆角/ $^{\circ}$ Major-axis ellipse angle/ $^{\circ}$	宽高比 Width-to-height ratio	固体度 Solidity
①	A 层	35	0.77±0.13a	0.74±0.19a	1.53±0.83a	48.84±28.69a	0.94±0.27a	0.93±0.03a
	B 层	41	0.70±0.13a	0.61±0.21b	1.95±1.00b	56.74±30.34a	0.90±0.42b	0.93±0.02a
②	A 层	75	0.75±0.11a	0.74±0.13a	1.41±0.41a	38.71±27.09a	1.10±0.27a	0.93±0.02a
	B 层	50	0.63±0.14b	0.60±0.22b	2.01±0.98b	62.64±26.73b	0.82±0.37b	0.93±0.03b
③	A 层	68	0.83±0.07a	0.76±0.11a	1.33±0.20a	41.25±27.46a	1.06±0.25a	0.93±0.01a
	B 层	77	0.77±0.10a	0.73±0.14a	1.45±0.42a	42.67±27.64a	1.04±0.29a	0.93±0.02b
④	A 层	73	0.84±0.07a	0.79±0.12a	1.30±0.27a	44.72±27.14a	1.03±0.21a	0.94±0.02a
	B 层	36	0.69±0.14b	0.60±0.24b	2.06±1.10b	67.72±28.00a	0.72±0.32b	0.94±0.02a
⑤	A 层	81	0.81±0.14a	0.78±0.11a	1.31±0.21a	46.35±26.70a	1.04±0.24a	0.94±0.02a
	B 层	21	0.59±0.12a	0.66±0.18b	1.67±0.67b	56.87±28.64b	0.97±0.36a	0.94±0.02a
⑥	A 层	70	0.79±0.11a	0.78±0.10a	1.31±0.19a	40.24±29.71a	1.11±0.24a	0.93±0.02a
	B 层	37	0.75±0.09b	0.78±0.14a	1.36±0.50a	43.14±30.25a	1.00±0.24a	0.93±0.02a
⑦	A 层	65	0.75±0.12a	0.78±0.10a	1.31±0.16a	36.17±27.45a	1.12±0.25a	0.93±0.02a
	B 层	37	0.72±0.10a	0.74±0.19a	1.53±0.70a	43.64±33.26b	0.98±0.32a	0.95±0.02a
⑧	A 层	46	0.87±0.06a	0.78±0.10a	1.30±0.18a	46.07±30.20a	1.02±0.24a	0.93±0.01a
	B 层	45	0.81±0.10a	0.73±0.18a	1.53±0.70b	46.81±32.91a	0.97±0.32b	0.95±0.02a
⑨	A 层	57	0.66±0.17a	0.75±0.12a	1.38±0.12a	38.12±25.65a	1.09±0.25a	0.90±0.03a
	B 层	53	0.62±0.12b	0.74±0.13a	1.74±0.13b	39.09±29.34a	1.08±0.29a	0.94±0.03a

注：同列不同字母表示不同发生层间差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different horizons ($P<0.05$).

差异。角块状、圆柱状、团粒状、棱柱状和次角块状结构体的平均长宽比值分别为 1.373、2.975、1.263、3.443、1.299，等维结构体与各向异性结构体依旧表现出显著差异，同时，等维形状结构体中，团粒状结构与角块状结构也有较大差异；角块状、圆柱状、团粒状、棱柱状和次角块状结构体的平均固体度值分别为 0.937、0.943、0.927、0.921、0.948，结果显示，棱柱状结构与其他结构均表现出显著差异。

2.3 剖面形态特征

由表 4 可知，9 个剖面表层土壤结构体的平均圆角率值均高于心土层，其中剖面②、④、⑥、⑨表层与心土层之间土壤结构体的平均圆角率值差异显著；9 个剖面表层土壤结构体的平均圆度值均高于心土层，其中剖面①、②、④、⑤的表土层结构体平均圆度值与心土层结构体平均圆度值差异显

著；9 个剖面表层土壤结构体的平均长宽比值均低于心土层，其中剖面①、②、④、⑤、⑧、⑨的表土层结构体平均长宽比值与心土层结构体平均长宽比值差异显著；9 个剖面表层土壤结构体的平均长轴椭圆角值均低于心土层，其中剖面②、⑤、⑦的表土层结构体平均长轴椭圆角值与心土层结构体平均椭圆角值差异显著；9 个剖面表层土壤结构体的平均宽高比值均高于心土层，其中剖面①、②、④、⑤、⑧的表土层结构体平均宽高比值与心土层结构体平均宽高比值差异显著；剖面编号②、③的表土层结构体平均固体度值与心土层结构体平均固体度值差异显著。

由表 5 可知，9 个土壤剖面的团粒状结构均主要集中在 A 层，分别约占 A 层结构体数量的 54%、64%、85%、63%、60%、75%、75%、78%、84%；角块状、次角块状、棱柱状和圆柱状结构主要集中

表 5 土壤剖面 A 层与 B 层土壤结构体形状数量对比

Table 5 Comparison of the number of ped shapes in layer A and layer B of the soil profile

剖面编号	发生层	团粒状	角块状	次角块状	棱柱状	圆柱状	数量
Profile No.	Horizon	Granular	Angular blocky	Subangular blocky	Prismatic	Columnar	Number
①	A 层	19	4	9	3	0	35
	B 层	4	13	13	8	3	41
②	A 层	48	10	16	1	0	75
	B 层	10	8	13	12	7	50
③	A 层	58	10	0	0	0	68
	B 层	35	19	20	3	0	77
④	A 层	46	11	16	0	0	73
	B 层	2	5	16	10	3	36
⑤	A 层	49	22	10	0	0	81
	B 层	1	14	3	3	0	21
⑥	A 层	53	6	11	0	0	70
	B 层	9	7	19	2	0	37
⑦	A 层	49	5	11	0	0	65
	B 层	5	10	17	3	2	37
⑧	A 层	36	6	4	0	0	46
	B 层	5	15	20	3	2	45
⑨	A 层	48	4	5	0	0	57
	B 层	6	19	25	2	1	53

在 B 层，分别约占 70%和 56%，棱柱状和圆柱状结构则主要聚集在土壤 B 层，仅有 6%的柱状结构出现在土壤 A 层。

3 讨 论

数字图像技术是量化土壤结构体形态特征的一种重要手段。本研究通过 Adobe Illustrator 和 Image J 软件处理高分辨率土壤剖面图像，以一致、便捷的方式数字化多张图像，从而确保结果的可重复性和标准化。基于 Holden^[18]的研究，本研究提出了圆角率、圆度、长轴椭圆角、长宽比、固体度和宽高比等六个土壤结构体形态计量学特征指标。数字形态计量学特征值计算结果表明，圆角率可以对本研究的五种结构体形状（团粒状、次角块状、角块状、圆柱状、棱柱状）均作出区分；等维形状和各向异性形状的长轴椭圆角和宽高比之间差异显著；圆度和长宽比则可以区分块状结构（次角块状、角块状）以及柱状结构（圆柱状、棱柱状）；棱柱状结构的固

体度与其他结构之间差异显著。因此，通过本研究提出的六个形态计量学指标，典型的结构分类和主观描述被转化为定量的形状数据。土壤工作者广泛使用感官评价方法进行土壤结构的定量化，经验和视觉信息是其分辨结构体形状的主要途径^[21-24]。根据本研究中相关土壤专家和学者的反馈结果(图 4)，他们普遍在分辨角块状与次角块状、棱柱状与角块状以及圆柱状与次角块状时存在分歧。尤其是对棱柱状、角块状的分类错误率较高，除>30 年工作年限的土壤工作者以外，各个工作年限的平均正确率均不足 70%，所有专家学者识别棱柱状、角块状的正确率仅为 61%和 58%。这些误差可能归因于土壤工作者的判断错误或经验不足。此外，如图 2 所示，由于初始土壤剖面图像的背景十分复杂（如过明或过暗、植物根系黏连和阴影面积等），也可能导致土壤工作者在分辨土壤结构的过程中出现错误。而经过二值化处理后图像呈现的土壤结构体形状与背景对比清晰，更易辨别。因此，通过数字形态计量

学方法可以有效地减少和降低人为因素和自然因素的干扰, 相比较于依赖视觉和经验的传统定性分类方法, 本研究通过剖面数字图像计算出土壤结构体定量的形状数据, 再将其代入到土壤结构分类表^[20]进行分类的方法更具客观性、一致性和可测量性。此外, 在处理数字图像的过程中发现, 原始的土壤剖面数码图像可能会存在一些“噪声”, 这些“噪声”往往会影响分析结果。因此, 在二值化处理时应去除噪点以避免“噪声”对分析结构体轮廓边缘的影响, 从而提高分析精度。

土壤结构的形成与演变、冻融循环、破碎崩解、根系生长和有机质胶结等作用机制密切相关^[2, 25, 26], 由于人为耕作和大气循环的影响, 这些机制可能在表层土壤结构的形成与演变中扮演着重要角色。通过对比土壤剖面 A 层与 B 层土壤结构体形态计量学参数后发现, 9 个土壤剖面中表层土壤结构体形状的圆角率和圆度均高于心土层和母质层。如前所述, 结构体形状区域越小且角和边越多代表着圆角率和圆度值越小, 这意味着土壤表层中接近于圆球状的团粒结构高于心土层和母质层, 这说明在农耕条件下, 表层土壤结构体形成的过程, 不仅是母质层颗粒在土壤膨胀收缩作用下破碎的过程^[27], 也可能是土壤结构体形状逐渐从块状结构向圆球状结构转化的过程。在进一步对土壤剖面各层次中不同结构体类型的数量进行统计后发现, 9 个土壤剖面的团粒状结构均主要集中在土壤表层(占比为 71%), 其数量远超其他结构(角块状、次角块状、棱柱状、圆柱状)数量的总和, 9 个土壤剖面的团粒状结构均主要集中在 A 层, 分别约占 A 层结构体数量的 54%、64%、85%、63%、60%、75%、75%、78%、84%。这一研究结果与前文有关土壤结构体在形成与演变过程中的转化趋势一致。在本研究中, 团粒状结构在 9 个土壤剖面表层大量聚集且随着深度增加而数量逐渐减少的现象可能与团聚体形成机制有关^[28-32]。有机质是形成土壤团聚体最重要的胶结物质, 有机质中不同组分的协调作用可促使土壤颗粒间胶结, 从而改变土壤结构体形态。在本研究中, 来自 9 个土系的土壤个体由于长时间的施肥耕作, 也出现了有机质在耕作层聚集, 在心土层和母质层减少的现象。这一现象与 Jobbágy 和 Jackson^[33]研究基本一致。另一方面, 表层土壤的蚯蚓压实和剥离作用也可能是造成土壤结构体以圆球状结构为主要结构特征的一种重要因素^[34]。而在本研究中, 次角块状和柱状结构在 B 层中占比较高, 这可能与 B 层

中高浓度的硅酸盐黏土及其在高垂直压力下土壤收缩引起横向相邻结构单元分离现象有关^[35-36]。

在本研究中, 基于数字图像技术量化土壤结构体形状的方法不仅能够定量表征现有图像中的土壤结构体, 还阐明了土壤结构体形状在形成过程中逐渐向圆球状转化的规律, 为从区域尺度上定量表征土壤结构提供了技术支持和理论依据。对于未来有关土壤结构体形状的定量研究, 本文建议从每个土壤剖面上采集一定数量的结构体, 并拍摄结构体的照片, 以掌握它们的形状轮廓。将这些结构体作为单个样本拍摄, 同时结合剖面数字化图像, 可以更加准确、客观地量化土壤结构形态特征。

4 结 论

本研究发现数字形态测量方法能够快捷方便, 准确无损地量化土壤结构体形态特征。此方法能够将土壤结构的典型分类描述转换为连续的定量数据。在对土壤结构体形状进行分类时, 可通过剖面数字图像计算出土壤结构体定量的形状数据(圆角率、圆度、长轴椭圆角、长宽比、坚固度和宽高比), 再参照传统的土壤结构分类表进行分类, 以避免人为误差。9 个土壤剖面中表层土壤结构体的圆角率、圆度较心土层土壤结构体圆角率、圆度大, 说明在农耕条件下, 表层土壤结构体形成过程可能是土壤结构体形状逐渐从块状结构向圆球状结构转化的过程。

参考文献 (References)

- [1] Nikiforoff C C. Morphological classification of soil structure[J]. *Soil Science*, 1941, 52 (3): 193—212.
- [2] Díaz-Zorita M, Perfect E, Grove J. Disruptive methods for assessing soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 64 (1): 3—22.
- [3] Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [4] Gong Z T, et al. *Chinese soil taxonomy: Theory, methodology and practices*[M]. Beijing: Science Press, 1999. [龚子同, 等. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [5] Warrick A W. *Soil physics companion*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
- [6] Jouquet P, Huchet G, Bottinelli N, et al. What are the limits of the drilosphere? An incubation experiment using *Metaphire posthuma*[J]. *Pedobiologia*, 2011, 54: 113—117.
- [7] Dexter A R. Shapes of aggregates from tilled layers of

- some Dutch and Australian soils[J]. *Geoderma*, 1985, 35 (2): 91—107.
- [8] Batey T, McKenzie D C. Soil compaction: Identification directly in the field[J]. *Soil Use and Management*, 2006, 22 (2): 123—131.
- [9] Eck D V, Qin M M, Hirmas D R, et al. Relating quantitative soil structure metrics to saturated hydraulic conductivity[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(1): 1—11.
- [10] Maja B, Beata K. Suitability of image analysis in evaluating air and water permeability of soil[J]. *Agronomy*, 2021, 11 (9): 1883.
- [11] Qi Z H, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Effect of root system on macropores distribution and saturated permeability of surface soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35 (5): 94—100, 107. [祁子寒, 王云琦, 王玉杰, 等. 根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35 (5): 94—100, 107.]
- [12] Yu M. Effects of macropore on soil water movement and microplastics pollution in on typical farmland and woodland in loess region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021. [余森. 黄土区典型农林地土壤大孔隙对水分运动参数和微塑料污染的影响机制研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.]
- [13] Liang A Z, Zhang Y, Zhang X P, et al. Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined nondestructive measurements and phospholipid fatty acid analysis[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 185: 94—101.
- [14] Liu J J, Chen X B, Qin Z C, et al. Soil pore structure and water movement characteristics of sugarcane field under the influence of two typical tillage methods[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37 (2): 237—245. [刘俊杰, 陈晓冰, 秦梓城, 等. 2 种典型耕作方式影响下的蔗田土壤孔隙结构及其水分运动特性[J]. *水土保持学报*, 2023, 37 (2): 237—245.]
- [15] Holden N M. Description and classification of soil structure using distance transform data[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52 (4): 529—545.
- [16] Tobias B, John K, Ararso E, et al. Changes in pore networks and readily dispersible soil following structure liming of clay soils[J]. *Geoderma*, 2021, 390: 114948.
- [17] Zhang J, Chen L, Zhou H, et al. Quantification of soil pore structure based on digital image technology: A review[J]. *Soils*, 2023, 55 (1): 21—29. [张靖, 陈琳, 周虎, 等. 基于数字图像技术的土壤孔隙结构定量研究进展[J]. *土壤*, 2023, 55 (1): 21—29.]
- [18] Holden N M. A two-dimensional quantification of soil ped shape[J]. *Journal of Soil Science*, 1993, 44 (2): 209—219.
- [19] Hartemink A E, Minasny B. Towards digital soil morphometrics[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 305—317.
- [20] Schoeneberger P J, Wysocki D A, Benham E C, et al. Field book or describing and sampling soils[M]. Lincoln: Natural Resources Conservation Service, 2012.
- [21] Askari M S, Cui J F, Holden N M. The visual evaluation of soil structure under arable management[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 134: 1—10.
- [22] Ball B C, Batey T, Munkholm L J. Field assessment of soil structural quality—A development of the Peerlkamp test[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23 (4): 329—337.
- [23] Pulido Moncada M, Gabriels D, Lobo D, et al. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 139: 8—18.
- [24] Arvidsson J, Keller T, Gustafsson K. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79 (2): 221—231.
- [25] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11 (3/4): 199—238.
- [26] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 3—22.
- [27] Horn R, Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 82 (1): 5—14.
- [28] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Soil Research*, 1991, 29 (6): 815.
- [29] Wei C F, Xie D T, Li B G. Progress in reserch on soil organo-mineral complexes[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18 (2): 221—227. [魏朝富, 谢德体, 李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2003, 18 (2): 221—227.]
- [30] Rillig M C, Muller L A, Lehmann A. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11 (9): 1943—1948.
- [31] Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, et al. Microaggregates in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181 (1): 104—136.
- [32] Krause L, Rodionov A, Schweizer S A, et al. Microaggregate stability and storage of organic carbon is affected by clay content in arable Luvisols[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 182: 123—129.
- [33] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10 (2): 423.
- [34] Blanchart E, Lavelle P, Braudeau E, et al. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29 (3/4): 431—439.
- [35] Heitman Joshua L. Hartge/horn: Essential soil physics, an introduction to soil processes, functions, structure, and mechanics [J]. *Soil Science*, 2017, 182 (3): 114.
- [36] Mohammed A K, Hirmas D R, Nemes A, et al. Exogenous and endogenous controls on the development of soil structure[J]. *Geoderma*, 2020, 357: 113945.

(责任编辑：檀满枝)